نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۹، شماره ۲، تابستان۱۴۰۱، ص: ۳۳- ۵۳

J. Energy Conversion
Volume: 9, Issue: 2, 2022: 33-53

DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5

بررسی عددی کاهش نیروی درگ جریان بوسیله سطوح ریبلتی در هندسه و ابعاد مختلف

حسین صفری[۱*]، علیرضا رئوف پناه [۲]

*۱- دانشجو، گروه مهندسی مکانیک، واحد یادگار امام (ره)، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. hossfri.unive@gmail.com
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یادگار امام (ره)، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۰۳، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵

چکیده

امروزه، با توجه به کم بودن منابع انرژی ، صنایع توجه بیشتری به مساله بهره وری انرژی نشان می دهند. در بخش های کاهش مصرف انرژی و افزایش سرعت کشتی ها و زیردریایی ها، بحث مقاومت اصطکاکی سطح نقش بسیار مهمی دارد. سطوح ریبلتی، یک روش منفعل هستند که توانایی کاهش درگ (پسا) سطوح را دارا می باشند. این مطالعه، به بررسی عددی کاهش پسای ۴ هندسه مختلف و جدید ریبلتی در ابعاد و سرعت های مختلف می پردازد. جریان در محدوده رژیم جریان آرام بوده و ریبلت ها به صورت عمود بر جهت جریان قرار گرفته اند. همچنین توزیع تنش برشی و فشار استاتیکی بر روی سطوح ریبلتی مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج نشان دادند که هندسه های ۱ و ۴ میزان کاهش پسای بالاتری را (در حدود ٪۱۰/۷ و ٪۱۰/۲) نسبت به هندسه های ۲ و۳ (در حدود ٪۷/۷ و ٪۴/۴) به ترتیب، ارائه می دهند. برخلاف هندسه های۱ و ۴ ، هندسه های ۲ و ۳ نیروی پسای اصطکاکی بالاتری را نسبت به نیروی پسای فشاری بر روی سطوح خود دارند. همچنین مطالعه تغییرات سرعت نشان داد که هندسه های ۱ و ۴ کاهش درگ بالاتری را به ترتیب در هرکدام از سرعت ها دارند.

* **عهده‌دار مکاتبات:** hossfri.unive@gmail.com

کلمات کلیدی: ریبلت، کاهش درگ، شبیه سازی عددی.

۱- مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون مصرف سوخت های فسیلی در اثر رشد اقتصاد و از طرفی محدودیت این منابع و افزایش آلاینده های زیست محیطی، استفاده از روش هایی برای کاهش مصرف انرژی توسط صنایعی از جمله صنایع هوانوردی و دریانوردی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان یک بخش مهم از صنعت حمل و نقل، بخش های ناوبری و کشتیرانی مقدار بسیار زیادی از سوخت را مصرف می کنند. مقاومت بدنه کشتی های دریایی شامل پسای فشاری، اصطکاک پوسته ای (ویسکوز) و مقاومت تولید موج می باشد. مقاومت اصطکاکی کشتی های سرعت بالا برابر ۴۰ تا ۵۰ درصد مقاومت کل آنها می باشد در حالی که برای کشتی های سرعت پایین این عدد بین ۷۰% تا ۸۰% می باشد. ریبلت ها میکروشیارهای طولی، عرضی و همچنین زاویه دار هستند که بر روی سطح دیواره شکل دهی شده و دو هدف کاهش نیروی پسای جریان عبوری از روی

نحوه استناد به این مقاله: حسین صفری، علیرضا رئوف پناه. بررسی عددی کاهش نیروی درگ جریان بوسیله سطوح ریبلتی در هندسه و ابعاد مختلف. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱; ۹ (۲) : ۵۶-۳۵.
DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

دیواره و افزایش مساحت سطح برای انتقال حرارت و مونتوم را ارائه می دهند. مفهوم ریبلت از پوست کوسه الهام گرفته شده است که دارای شیارهای V شکل می باشد و سبب می شود که نیروی درگی را که این شکارچیان سریع در حال حرکت در زیر آب حس می کنند، بسیار کاهش یابد. پوست کوسه شامل دندانه های پوستی زبری بوده که این شیارها بر روی بدن کوسه از سر تا دم آن متفاوت می باشند و طوری طراحی شده اند که با حرکت پرتابی بدن کوسه هنگام شنا هماهنگ باشند. دستیابی به کاهش نیروی پسای ناشی از اصطکاک پوسته ای از طریق استفاده از ریبلت ها، موضوع تحقیقات متمرکز در طول چندین دهه اخیر بوده است . بنابراین اهمیت دادن به تحقیقات در راستای کاهش درگ ویسکوز مهم می باشد ، زیرا می تواند بهبودی سرعت و حفظ انرژی در یک زمان را تحقق بخشد. مطالعات آزمایشگاهی فراوانی برای بررسی اثر ریبلت‌ها در کاهش پسا انجام شده است. ک. کوئلتزسچ و همکاران [1] ریبلت های همگرا و واگرا را بر روی سطح داخل لوله در یک جریان توربولانس مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آنها تغییرات چشمگیری در میدان سرعت نزدیک دیواره مشاهده شد. در نزدیکی دیواره ، الگوهای ریبلتی همگرا و واگرا تفاوت های قابل توجهی را با توجه به میانگین زمانی سرعت جریان سو U و نوسانات جریان سوی سرعت نشان دادند. همچنین مقدار کاهش درگ تا حدود ۱۰% بدست آمد. هکان رپ و همکاران [2] سطوح ریبلتی میکروساختاری با ریبلت های مستطیلی که با استفاده از روش فوتولیتوگرافی بر روی یک سطح سیلیکونی ساخته شده بودند را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که مکانیسم کاهش پسا با افزایش ضخامت لایه ویسکوز موثر ایجاد می شود، که ناشی از تفاوت در ارتفاعات پیش آمدگی ریبلت ها در جریان های موازی و متقاطع می باشد. دویونگ بیون و همکاران [3] به بررسی ویژگی های جریان بر روی سطح ریبلتی مصنوعی فوق آبگریز که از طبیعت الهام گرفته شده بود، پرداختند. نتایج بررسی آنها، افزایش ناگهانی پروفیل سرعت در نزدیکی دیواره را نشان داد. همچنین تولید گردابه در داخل شیار ریبلت ها سبب افزایش سرعت و ایجاد نوسانات سرعت در جریان عبوری شده که مربوط به مقدار بالاتر تنش برشی در نزدیکی قله های شیارهای ریبلتی می باشد. اگریم سارین و همکاران [4] فیلم های ریبلتی را بر روی ایرفویل های توربین بادی به کار بردند. در نتایج بدست آمده آنها ریبلت های با سایز بهینه، کاهش درگ ٪۴ الی ٪۵ را تولید کردند،در حالیکه ، ریبلت های با سایز بهینه نشده در بعضی موارد درگ را تا ٪۱۰ الی ٪۱۲ افزایش دادند. وا اف فو و همکاران [5] به بررسی تاثیر مساحت سطح ریبلتی الهام گرفته از پوست کوسه بر روی عملکرد کاهش درگ آنها پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش فاصله عرضی ریبلت، نسبت کاهش درگ ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. میتسورو کوریتا و همکاران [6] به بررسی کاهش اصطکاک پوسته ای بدنه یک هواپیمای آزمایشی که با ریبلت پوشش داده شده بود، پرداختند. داده های اندازه گیری شده ی میانگین توزیع سرعت در لایه مرزی در حین پرواز ، از نظر کیفی تطابق قابل قبولی را با داده های تست تونل باد ارائه دادند. بنابراین نشان داده شد که طرح ریبلتی آنها در پرواز به طور موثری عمل می کند. چونگای هوای و همکاران [7] به بررسی کاهش نیروی درگ یک جریان با سیال سورفکتانت، در یک کانال با ریبلت های طولی پرداختند. آنها دریافتند که عملکرد کاهش درگ محلول سورفکتانت بوسیله شیارهای طولی (ریبلت ها) افزایش می یابد. ام اف تاچی و همکاران [8] به بررسی جریان توربولانس دارای گرادیان فشار، بر روی دیواره های ریبلتی همگرا شونده در یک کانال باز پرداختند. نتایج نشان داد که گرادیان فشار مورد نظر، تاثیرات قابل توجهی را بر روی ویژگی های درگ جریان ندارند. یانگ شائوگیونگ و همکاران [9] به بررسی تاثیر ساختارهای منسجم ریبلتی عمود بر جهت جریان بر روی لایه مرزی توربولانس پرداختند. آنها کاهش درگی برابر با ۶/۱۷% را بدست آوردند. یوبو ژانگ و دفوچه [10] شیارهای V شکل دو بعدی را در یک جریان توربولانس مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج توربولانس بر روی دیواره های صاف و ریبلتی نشان داد که حضور دیواره ریبلتی منجر به تغییرات قابل توجهی در آشفتگی جریان (توربولانس) می شود. همچنین میزان تراکم ریبلت ها، نقش مهمی را در کاهش نیروی پسا، بازی می کند. هانگ وی ما و همکاران [11] به بررسی جریان لایه مرزی توربولانس گذرنده از روی دو صفحه تخت و ریبلتی پرداختند. آنها با استفاده از تکنیک جریان حباب هیدروژن در تونل آب به بصری سازی جریان داخل آن پرداختند. جیان فنگ هو و همکاران [12] به بررسی توانایی روش ۲ بعدی و ۳ بعدی سرعت سنجی تصویری ذره و سرعت سنجی پیمایشی ذره، به جهت مشخص سازی ساختار ۳ بعدی جریان توربولانس بر روی یک سطح ریبلتی با شیارهایی با فاصله ۷۵۰ μm ، پرداختند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

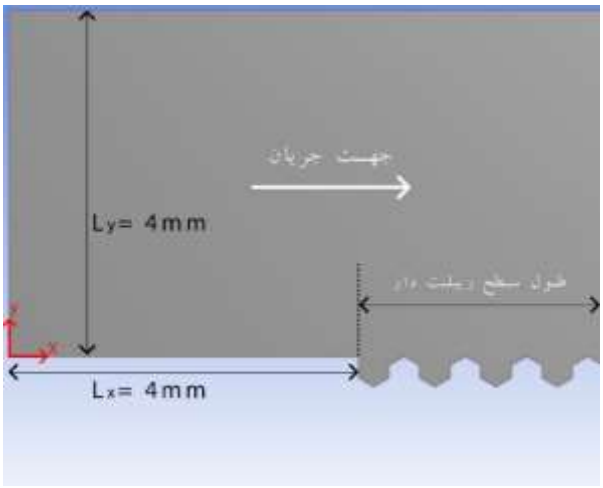
نتایج میزان کاهش اصطکاک پوسته ای برابر ٪۱/۶ و کاهش تنش برشی دیواره برابر ٪۴/۷ را بر روی سطح ریبلتی نشان دادند. در این میان محققینی به بررسی تحلیلی ریبلت ها پرداختند. ام .اسکول [13] در یک مطالعه تحلیلی به بررسی کاهش نیروی درگ در یک جریان کوئت در یک سیال نیوتنی بین دو سطح که یکی از سطوح صاف و دیگری دارای ریبلت هایی عمود بر جهت جریان به شکل سطح موجی شکل می بود، پرداخت. نتایج نشان داد که سطح موجی با قله های تیز منجر به کاهش پسای ٪۱۰ در مقایسه با سطح موجی سینوسی با همان پارامترهای هندسی می شود. روش حل عددی مستقیم نیز به عنوان ابزاری بسیار سودمند و با دقت بالا مورد توجه بعضی از پژوهشگران قرار گرفته است. بنس چاپ و دبلیو پی بروگم [14] به بررسی یک الگوی ریبلتی با چیدمان همگرا، واگرا با طول موج عمود بر جریان پرداختند. آنها دریافتند که وجود ریبلت های همگرا، واگرا برای کاهش درگ توربولانس مضر به نظر می رسد. آلفرد فردمن و همکاران [15] به بررسی کاهش نیروی درگ در یک جریان کوئت مابین دو صفحه با شرایط مرزی جریان مورب پرداختند. آنها نتایج مدل ریاضی را در محدوده زیرلایه ویسکوز جریان بدست آوردند. . نتایج بدست آمده، کاهش نیروی درگ سطح ریبلتی را تا ۱۵% ، نسبت به سطح صاف قرار گرفته در بالای کانال و همچنین تا ۱۰% ، نسبت به سطح صاف قرار گرفته در بخش موثر جریان نشان می دهد. جین لی و همکاران [16] تاثیر عدد رینولدز بر روی کاهش درگ سطح ریبلتی تحت جریان توربولانس را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که با افزایش عدد رینولدز، عملکرد کاهش درگ سطح بهبود می یابد. همچنین اثر نوسانات در حرکت های جریانی بزرگ مقیاس (حرکات توده ای جریان)، در رینولدزهای بالا کاهش می یابد. میکائیل بی مارتل و همکاران [17] مکانیزم کاهش نیروی درگ یک سطح سوپرهیدروفوبیک شامل میکروشیارهای ریبلتی در یک کانال با رژیم جریان توربولانس را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که سطوح سوپرهیدروفوبیک، توانایی کاهش درگ در جریان توربولانس را بوسیله تغییر در زیرلایه لمینار ایجاد می کنند. السمنی و همکاران [18] به بررسی جریان کانال توربولانس دارای عدد رینولدز کم بر روی ریبلت های مستطیلی که به صورت غیریکنواخت بر روی تنها یکی از دیواره های کانال قرار گرفته بودند، پرداختند. بیشترین میزان کاهش درگ بدست آمده برابر ٪۱۱ بود. همچنین دریافتند که افزایش درگ زمانی رخ می دهد که فاصله بیشتر از ۳۰ برابر واحدهای دیواره باشد. علاوه بر روش حل عددی مستقیم، از مدل‌های آشفتگی نیز جهت شبیه‌سازی جریان بر روی ریبلت‌ها استفاده شده است. ژائو ون و همکاران [19] به بررسی کاهش نیروی درگ آیرودینامیکی وارد بر صفحات بدنه موتور خودرو با استفاده از سطوح ریبلتی الهام گرفته از طبیعت پرداختند. نتایج آنها نشان داد زمانی که سرعت خودرو به m/s ۳۰ می رسد، نرخ کاهش درگ تا ٪۱۰/۳۱بدست می آید. ژوگانگ و همکاران [20] اثر شیارهای عرضی عمود بر جریان را بر روی نیروی اصطکاکی وارد بر سطح مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها کاهش درگ ٪۱۲/۵را نسبت به سطح صاف نشان داد. جینگ کوی و یابو فو [21] به بررسی کاهش نیروی درگ و افت فشار در یک جریان میکروکانال پرداختند. آنها ۴ نوع سطح ریبلتی مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند. بائو وانگ و همکاران [22] به بررسی کاهش نیروی درگ سطح با استفاده از گردابه های تشکیل شده در میکروشیارهای مقطعی سطح پرداختند. نتایج آنها تشکیل گردابه هایی در شیارهای ریبلتی را نشان دادند که این گردابه ها، دلیل اصلی برای کاهش درگ می باشند. در بالای گردابه ها ، جهت دوران مطابق با جریان اصلی بود که سبب کاهش تنش های وارده از طرف جریان بر سطح می شوند. دابلیو. لی و همکاران [23] نیروی درگ توربولانس سطوح محرک موجی شکل، تحت دو حالت دارای ریبلت و بدون ریبلت را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که ترکیب سطح ریبلتی با حرکت موجی عرضی، کاهش درگ موضعی را افزایش داده و در مقایسه با یک جریان لایه مرزی بر روی یک سطح صاف غیر فعال (بدون موج)، کاهش درگ محلی را تا ٪۹/۴=DR نتیجه خواهد داد. در حالی که کاهش درگ با توجه به سطح ریبلتی (تنها) برابر ٪۴/۷ = DR می باشد. آرون بومسما و فوتیس سوتیروپولوس [24] با استفاده از روش شبیه سازی گردابه ای بزرگ به بررسی کاهش نیروی درگ ریبلت های حلزونی شکل در گرادیان های فشار معکوس پرداختند. به طور کلی ، ریبلت های حلزونی شکل در گرادیان فشار معکوس، خصوصیات کاهش دهنده درگ خود را حفظ می کنند ، اما شبیه سازی های این مطالعه گواه این است که فقط تحت گرادیان فشار معکوس متوسط تا قوی این خصوصیات افزایش یافته اند. امیررضا رستگاری و ریحانه اخوان [25] مکانیزم کاهش درگ را بر روی ۳ طرح ریبلتی شامل میکروشیارهای طولی، عرضی و زائده های ناپیوسته مورد بررسی قرار دادند. . آنها مقادیر کاهش درگ را به ترتیب برای میکروشیارهای ذکر شده برابر

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

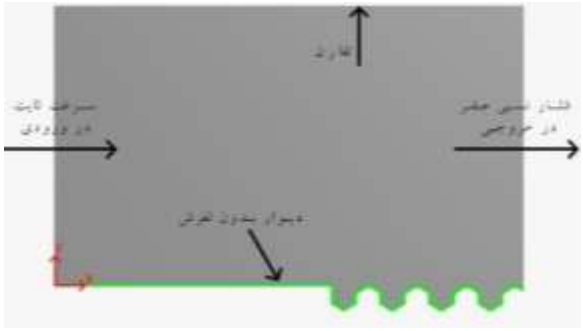
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

۵% تا ۸۳% برای مورد اول، ۴%- تا ۲۰% درصد برای مورد دوم و ۱۴% تا ۸۱% برای مورد سوم بدست آوردند. سان ژی هونگ و شی تینگ تینگ [26] ریبلت های مثلثی را بر روی یک روتور سرعت بالا تحت جریان هوای توربولانس مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از تنش برشی دیواره نشان می دهد که روتورهای سرعت بالا با سطح ریبلتی، می تواند نیروی درگ وارده از سمت هوا را تا مقدار قابل قبولی کاهش دهد و عمق شیار ریبلت و فاصله داخلی بین آنها، بر نیروی درگ کل تاثیرگذار است. بهراد زینلی و همکاران [27] ویژگی ها و ضریب درگ جریان توربولانس بر روی سطح یک سیلندر که بخشی از آن ریبلتی شده بود را مورد ارزیابی قرار دادند. . نتایج حاصل از ضریب درگ، تنش برشی سطح و سرعت لغزشی نشان دادند که اعمال حالت سوپرهیدروفوبیکی در پشت سیلندر بین 90° تا 180° ، تاثیر کمی را در کاهش ضریب درگ دارد، درحالی که اعمال این حالت در جلوی سیلندر بین 0° تا 90° ، بدرستی ضریب درگ را کاهش خواهد داد. گویان-کینگ و همکاران [28] به بررسی ریبلت های مورب مثلثی تحت تاثیر جهت گیری زاویه جریان نسبت به زاویه قرار گیری ریبلت ها پرداختند. آنها میزان مقاومت اصطکاکی و نرخ کاهش درگ را بر روی این ریبلت ها، مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان دادند که با افزایش سرعت و همچنین زاویه انحراف (بردار سرعت نسبت به راستای ریبلت ها)، مقاومت فشاری به وضوح افزایش خواهد یافت، همراه با کاهش در مقاومت ویسکوز. بیشترین نرخ کاهش درگ ریبلت های بدست آمده در کار آنها ٪۳۳/۷ می باشد.

با توجه به موارد بیان شده، اهمیت استفاده از ریبلت ها در کاهش درگ سطوح قابل استفاده در تجهیزات و صنایع آشکار شد. هدف اصلی در این پژوهش بررسی ۴ هندسه جدید ریبلتی و همچنین بررسی تاثیر ابعاد و سرعت های مختلف جریان آزاد بر روی این هندسه ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. برخلاف اکثر مطالعات قبلی که به بررسی ریبلت ها در یک جریان توربولانس پرداخته اند، در این پژوهش بررسی کارکرد سطوح ریبلتی ارائه شده در محدوده جریان آرام مد نظر می باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از فرضیات ساده شونده ای، هندسه ای ۲ بعدی در نظر گرفته شده و سپس اثر استفاده از ۴ نوع هندسه مختلف جدید در کاهش میزان پسای وارد بر سطح در رژیم جریان آرام مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱ : شماتیکی از فضای محاسباتی و ابعاد هندسی ریبلت‌ها شامل w (عرض)، h (ارتفاع)



شکل ۲ : شرایط مرزی جریان.

۲- هندسه، شرایط مرزی و معادلات حاکم

صورت مسئله در پژوهش حاضر شبیه‌سازی جریان در یک فضای دوبعدی است که در شکل ۱ نشان داده شده است. سطح پایینی فضای محاسباتی در قسمت ابتدایی صاف است تا شبیه اثر جریان روی صفحه تخت را ایجاد نماید. در قسمت انتهایی فضای محاسباتی، هندسه های ریبلتی به صورت عمود بر جریان چیده شده‌اند. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای جریان

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

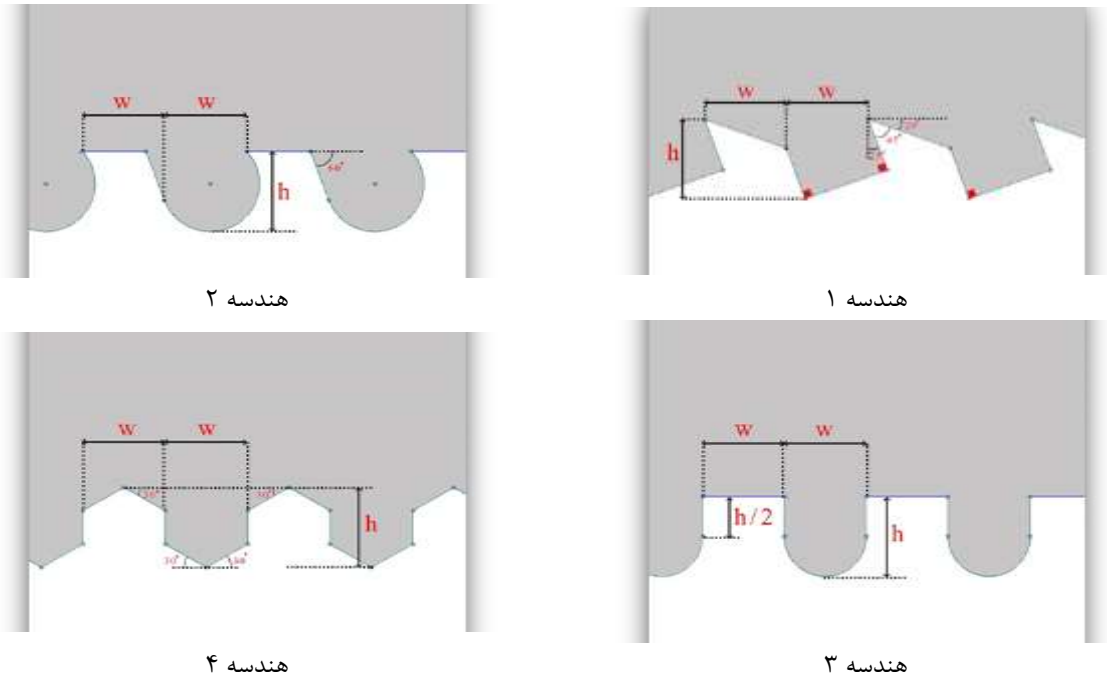
نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. در ورودی از شرط مرزی سرعت ثابت (۸ متر بر ثانیه) استفاده شده است. فشار نسبی در خروجی صفر می‌باشد. باید توجه داشت با توجه به ثابت بودن چگالی سیال و فرض تراکم‌ناپذیری، مقدار مطلق فشار تأثیری در حل مسأله ندارد. دیواره پایینی فضای محاسباتی دارای شرط عدم لغزش بوده و در سطح بالایی نیز شرط مرزی تقارن استفاده شده است. ۴ نوع هندسه ریبلتی در نظر گرفته شده در ۴ اندازه w=h=0.15mm , 0.25mm , 0.35mm , 0.45mm در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین زوایای مربوط به هر هندسه در تمامی ابعاد ثابت در نظر گرفته شده است.

تمامی معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پایستگی جرم و تکانه به روش حجم محدود گسسته‌سازی و حل شده‌اند. معادلات پایستگی جرم و تکانه به ترتیب توسط روابط (۱) و (۲) بیان می‌شوند.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \qquad (۲)$$

که در روابط فوق ρ، u، p و μ به ترتیب چگالی، سرعت، فشار و گرانروی دینامیکی سیال هستند. لازم به ذکر است که برای ارتباط سرعت و فشار در معادلات پایستگی جرم و تکانه از «روند حل کاپلد[1]» استفاده شده است. هم‌چنین تمامی عبارات جابه‌جایی در معادله تکانه با روش بادسوی مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند. معیار همگرایی برای باقیمانده معادلات پایستگی جرم و تکانه برابر با ۶-۱۰ در نظر گرفته شده است. سیال کاری آب با چگالی $998/2 kg/m^3$ و گرانروی ۰/۰۰۱۰۰۳ Pa.s در نظر گرفته شده است.



شکل۳: ۴ نوع هندسه ریبلتی مورد بررسی

لازم به ذکر است که عدد رینولدز برای جریان روی سطح به صورت زیر تعریف می‌گردد:

[1] Coupled algorithm

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

$$Re_x = \frac{\rho U_\infty L_x}{\mu} \quad (۳)$$

در این رابطه U_∞ سرعت جریان آزاد بوده و L_x نیز فاصله از ابتدای سطح (مبدأ مختصات) است. به این ترتیب بزرگترین عدد رینولدز در انتهای سطح رخ خواهد داد. با توجه به اینکه طولانی‌ترین سطح در پژوهش حاضر ۱۰/۱mm است، بنابراین بزرگترین عدد رینولدز ۱۰۴× ۹خواهد بود که از مقدار۱۰۵×۵ که عدد رینولدز بحرانی (گذار از جریان آرام به آشفته) جریان روی سطح است بسیار کوچکتر بوده و می‌توان از برقراری جریان آرام روی سطح اطمینان حاصل کرد.

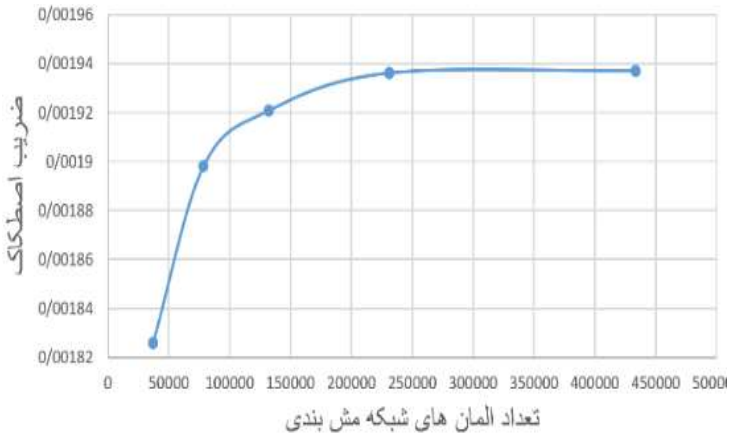
البته باید به این نکته اشاره کرد که به دلیل وجود ریبلت‌ها اغتشاشاتی در میدان جریان به وجود می‌آید (نسبت به سطح صاف بدون ریبلت) که می‌تواند باعث گذار از جریان آرام به آشفته در اعداد رینولدز کوچکتری شود. بنابراین شرایط جریان و هندسه در پژوهش حاضر به گونه‌ای انتخاب شده است تا عدد رینولدز جریان کوچک باشد و گذار به جریان آشفته رخ ندهد.

۳-۱) استقلال حل از شبکه

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، هندسه دو بعدی مطابق شکل ۱ با عرض، ارتفاع و فاصله ریبلت ۰/۱۵mm در نظر گرفته شده است. پنج شبکه محاسباتی مختلف تولید شده و مقادیر ضریب اصطکاک متوسط روی دیواره ریبلت‌ها برای هر کدام محاسبه شده است. ضریب اصطکاک متوسط مطابق رابطه (۴) تعریف شده است.

$$\overline{C_f} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (۴)$$

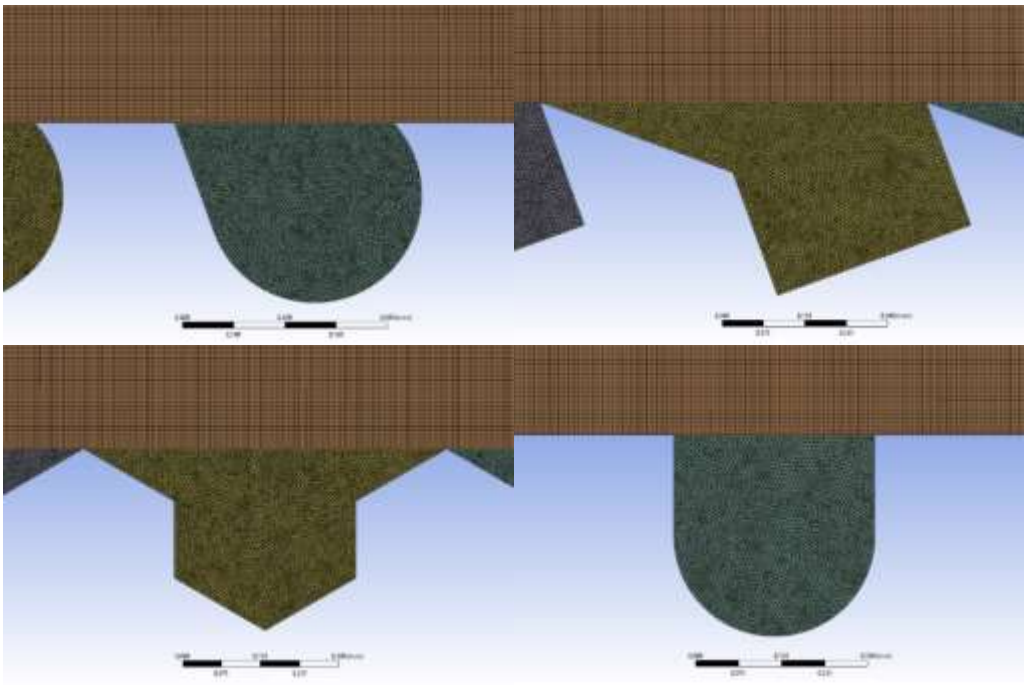
در این رابطه τ_w مقدار تنش برشی متوسط بر روی دیواره ریبلت‌دار است. نتایج مربوط به ضریب اصطکاک متوسط روی دیواره ریبلت‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد مش از مش شماره ۴ به مش شماره ۵ مقدار ضریب اصطکاک متوسط تنها ٪۰/۰۵ تغییر می‌کند (از۰/۰۰۱۹۳۶ به ۰/۰۰۱۹۳۷ تغییر می‌یابد). بنابراین مش شماره ۴ برای سایر شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است زیرا هم از دقت کافی برخوردار بوده و هم در هزینه محاسباتی صرفه‌جویی می‌کند. لازم به ذکر است که در تمامی هندسه‌ها از مش مثلثی برای داخل شیار ریبلت ها و از مش سازمان‌یافته (چهارضلعی) برای بخش های بالای ریبلت ها استفاده شده است. نمایی از شبکه محاسباتی تولید شده در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴: بررسی استقلال حل از شبکه.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

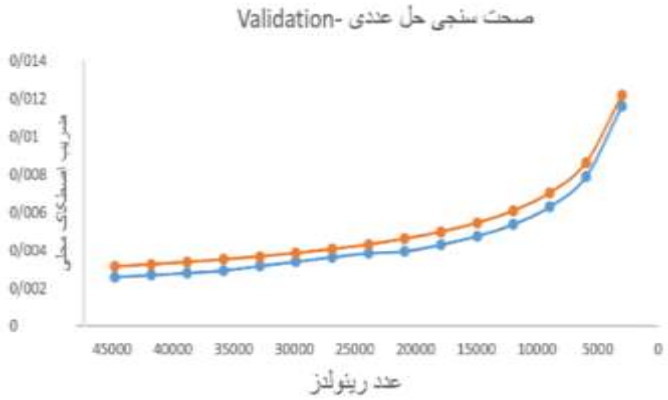


شکل ۵ : نمایی از شبکه محاسباتی تولید شده در مجاورت ریبلت‌ها.

۳-۲) صحت سنجی حل عددی :

به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از حل عددی نیاز است تا ابتدا صحت روش حل عددی سنجیده شود. برای این منظور می‌توان نتایج حاصل از حل عددی را با نتایج تجربی یا تحلیلی موجود مقایسه نمود. در پژوهش حاضر به منظور سنجش صحت حل عددی، جریان بر روی سطح صاف مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور صحت‌سنجی حل عددی مقادیر ضریب اصطکاک بر روی سطحی صاف بر روی دیواره پایینی که طولی برابر با سطح ریبلتی و در همان مکان سطح ریبلتی (شکل۱) از شبیه‌سازی محاسبه شده و با نتایج مربوط به فرمول تحلیلی زیر مقایسه شده است:

$$C_f = 0.664 Re_x^{-0.5} \quad (۳)$$



شکل۶ : صحت‌سنجی حل عددی.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

نتایج مربوط به شبیه‌سازی و فرمول تحلیلی در شکل ۶ با هم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد تطابق مناسبی میان نتایج برقرار است. بنابراین صحت روش عددی انتخاب شده تأیید می‌گردد.

همچنین به عنوان صحت سنجی دوم، مقاله دکتر علیرضا رئوف پناه و مهندس میرزایی [۳۱] که بررسی عددی کاهش پسای ریبلت های مستطیلی می باشد نیز مورد شبیه سازی قرار گرفته و نتایج بدست آمده با نتایج کار آنها مقایسه شده است. همانطور که در نمودارهای شکل ۷ مشاهده می‌گردد تطابق مناسبی میان نتایج برقرار است. بنابراین صحت روش عددی انتخاب شده تأیید می‌گردد.

جدول۱. داده های مربوط به رفرنس [31]

	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل
هندسه ۱	بدون ریبلت	–	۰٫۱۲۵۳	۰٫۱۲۵۳
	با ریبلت	۰٫۰۳۸٤	۰٫۰۷۷۱	۰٫۱۱۵۵
هندسه ۲	بدون ریبلت	–	۰٫۱۹۳۱	۰٫۱۹۳۱
	با ریبلت	۰٫۰۹۱۲	۰٫۰۷۹۹	۰٫۱۷۱۱
هندسه ۳	بدون ریبلت	–	۰٫۲۵۸۵	۰٫۲۵۸۵
	با ریبلت	۰٫۱٤٤۷	۰٫۰۷۸۳	۰٫۲۲۲۹
هندسه ٤	بدون ریبلت	–	۰٫۳۲۱۹	۰٫۳۲۱۹
	با ریبلت	۰٫۱۹۹۸	۰٫۰۷۳۲	۰٫۲۷۳۰

۴-نتایج و بحث

شبیه‌سازی‌ها در ۴ ابعاد ۰/۱۵ و ۰/۲۵ و ۰/۳۵ و ۰/۴۵ =w=h بر حسب میلیمتر بر روی ۴ هندسه مختلف، مطابق شکل ۳ انجام شده است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها نسبت $^{w}/_{h} = 1$ (نسبت جنبی) و زوایای خاص مربوط به هر هندسه (مطابق شکل ۳) ثابت در نظر گرفته شده است. مشخصات هر کدام از ۱۶ هندسه شبیه‌سازی شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

در ادامه اثر تغییر عرض و ارتفاع ریبلت‌ها در کاهش میزان پسای وارد بر سطح بررسی شده است. لازم به ذکر است که تمامی مقادیر ارائه شده برای پسای وارد بر سطوح در بخش‌های بعد، مقادیر متوسط پسا می‌باشد.

۴-۱ : اثر تغییر ابعاد ریبلت ها

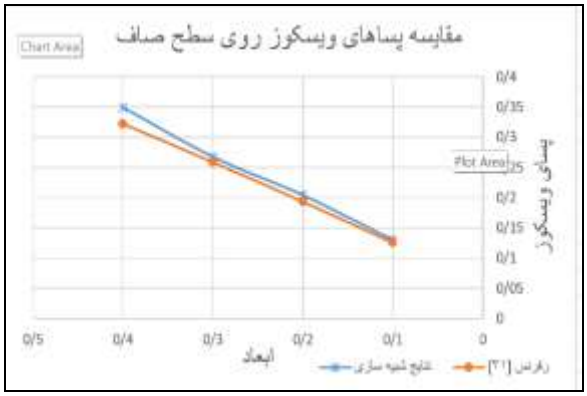
اثر تغییر ابعاد ریبلت‌ها (ارتفاع و عرض برابر) در کاهش پسای وارد بر سطح در شکل ۸ نشان داده شده است. هم‌چنین پسای وارد بر سطح بدون ریبلت متناظر نیز در این شکل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از این هندسه های ریبلتی اثر قابل قبولی در کاهش میزان پسای وارد بر سطح دارد. همچنین مطابق شکل ۸ هندسه ۱ بیشترین میزان کاهش پسا و هندسه ۳ کمترین میزان کاهش پسا را نسبت به سطح صاف دارد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

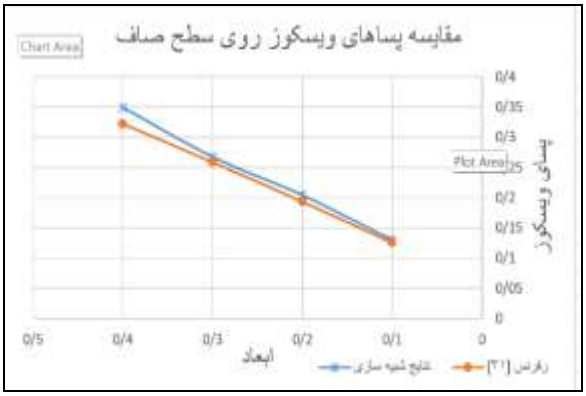
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]



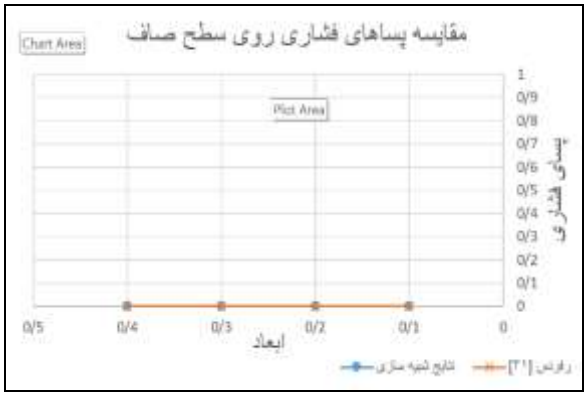
نمودار ۷-۱



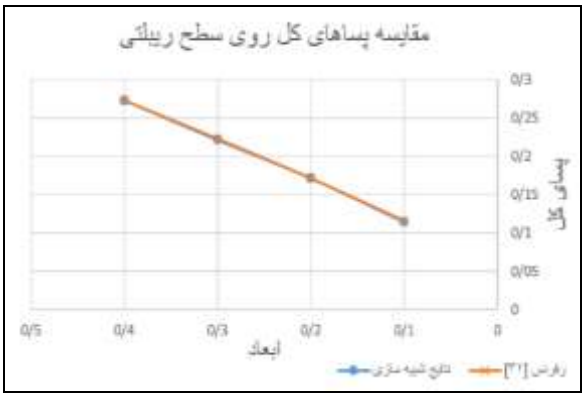
نمودار ۷-۲



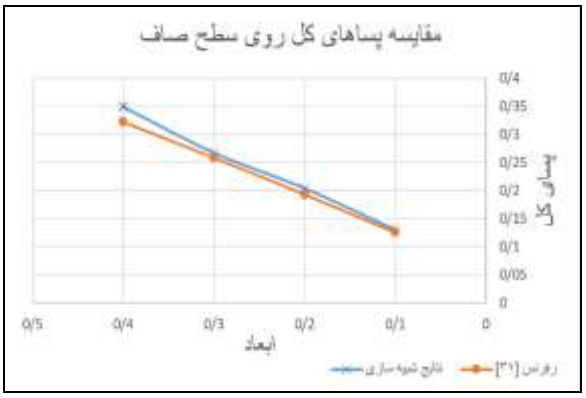
نمودار ۷-۳



نمودار ۷-۴



نمودار ۷-۵



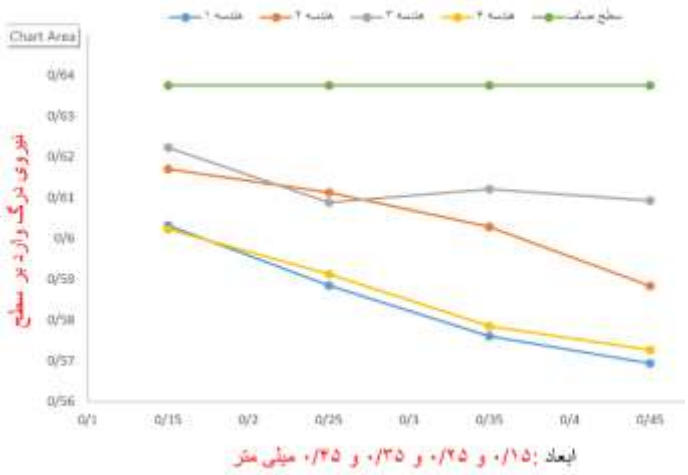
نمودار ۷-۶

شکل ۷: نمودارهای صحت سنجی با رفرنس [31] : شامل ۶ نمودار

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

جدول ۲. مشخصات ابعادی هندسه های ریبلت ها (ابعاد به میلیمتر)

نام	عرض	ارتفاع	نام	عرض	ارتفاع
هندسه 1	0.15	0.15	هندسه 3	0.15	0.15
هندسه 1	0.25	0.25	هندسه 3	0.25	0.25
هندسه 1	0.35	0.35	هندسه 3	0.35	0.35
هندسه 1	0.45	0.45	هندسه 3	0.45	0.45
هندسه 2	0.15	0.15	هندسه 4	0.15	0.15
هندسه 2	0.25	0.25	هندسه 4	0.25	0.25
هندسه 2	0.35	0.35	هندسه 4	0.35	0.35
هندسه 2	0.45	0.45	هندسه 4	0.45	0.45



شکل ۸. پسای وارد بر سطح در راستای جریان بر حسب ارتفاع

پسای وارد بر سطح در حالت بدون ریبلت تنها ناشی از اثر تنش برشی (اصطکاک) در سطح مشترک سیال و جامد است، اما در حالت سطح ریبلت‌دار بخشی از پسا به دلیل تنش برشی و بخشی دیگر به دلیل نیروی فشاری است. مقایسه میان اندازه هر کدام از این نیروها و درصد کاهش پسا در هرکدام از این ۴ هندسه در جداول ۳ تا ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که جمع پسای فشاری و اصطکاکی در حالت سطح ریبلت‌دار کمتر از پسای اصطکاکی در حالت سطح بدون ریبلت متناظر است. کمترین درصد کاهش پسا در هندسه ۳ با ابعاد ۰/۱۵mm با میزان کاهش پسای ٪۲/۳ و بیشترین میزان کاهش پسا در هندسه۱ با ابعاد ۰/۴۵mm با میزان کاهش پسای ٪ ۱۰/۷مشاهده می‌گردد. همچنین از نتایج موجود در جدول ۳ مشاهده می گردد که هندسه های ۱ و۴ دارای پسای فشاری بالاتر و پسای اصطکاکی کمتری نسبت به هندسه های ۲ و۳ می باشند . همچنین در تمام هندسه ها با افزایش ابعاد ریبلت ها، درصد کاهش پسا نیز افزایش می یابد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

جدول ۳ : مقایسه سهم پسای فشاری و اصطکاکی و درصد کاهش پسای هندسه ۱

هندسه 1	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل	درصد کاهش پسا
هندسه 1 0/15 mm	بدون ریبلت	–	0/6374	0/6374	–
	با ریبلت	0/5310	0/0721	0/6031	5/3
هندسه 1 0/25 mm	بدون ریبلت	–	0/6374	0/6374	–
	با ریبلت	0/5406	0/0478	0/5884	7/7
هندسه 1 0/35 mm	بدون ریبلت	–	0/6374	0/6374	–
	با ریبلت	0/5492	0/0267	0/5760	9/6
هندسه 1 0/45 mm	بدون ریبلت	–	0/6374	0/6374	–
	با ریبلت	0/5292	0/0401	0/5693	10/7

جدول ۴ : مقایسه سهم پسای فشاری و اصطکاکی و درصد کاهش پسای هندسه ۲

هندسه 2	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل	درصد کاهش پسا
هندسه2 0/15 mm	بدون ریبلت	–	0/6374	0/6374	–
	با ریبلت	0/2149	0/4019	0/6169	3/2
هندسه2 0/25 mm	بدون ریبلت	–	0/6374	0/6374	–
	با ریبلت	0/2075	0/4036	0/6111	4/1
هندسه 2 0/35 mm	بدون ریبلت	–	0/6374	0/6374	–
	با ریبلت	0.2143	0/3883	0/6027	5/4
هندسه 2 0/45 mm	بدون ریبلت	–	0/6374	0/6374	–
	با ریبلت	0.2676	0/3206	0/5883	7/7

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

جدول ۵. مقایسه سهم پسای فشاری و اصطکاکی و درصد کاهش پسای هندسه ۳

هندسه3	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل	درصد کاهش پسا
هندسه3 0/15 mm	بدون ریبلت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلت	0/1885	0.4337	0.6222	2/3
هندسه3 0/25 mm	بدون ریبلت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلت	0.1775	0.4312	0.6087	4/5
هندسه 3 0/35 mm	بدون ریبلت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلت	0.1891	0.4229	0.6120	3/98
هندسه 3 0/45 mm	بدون ریبلت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلت	0.1889	0.4202	0.6091	4/4

جدول ۶ : مقایسه سهم پسای فشاری و اصطکاکی و درصد کاهش پسای هندسه ۴

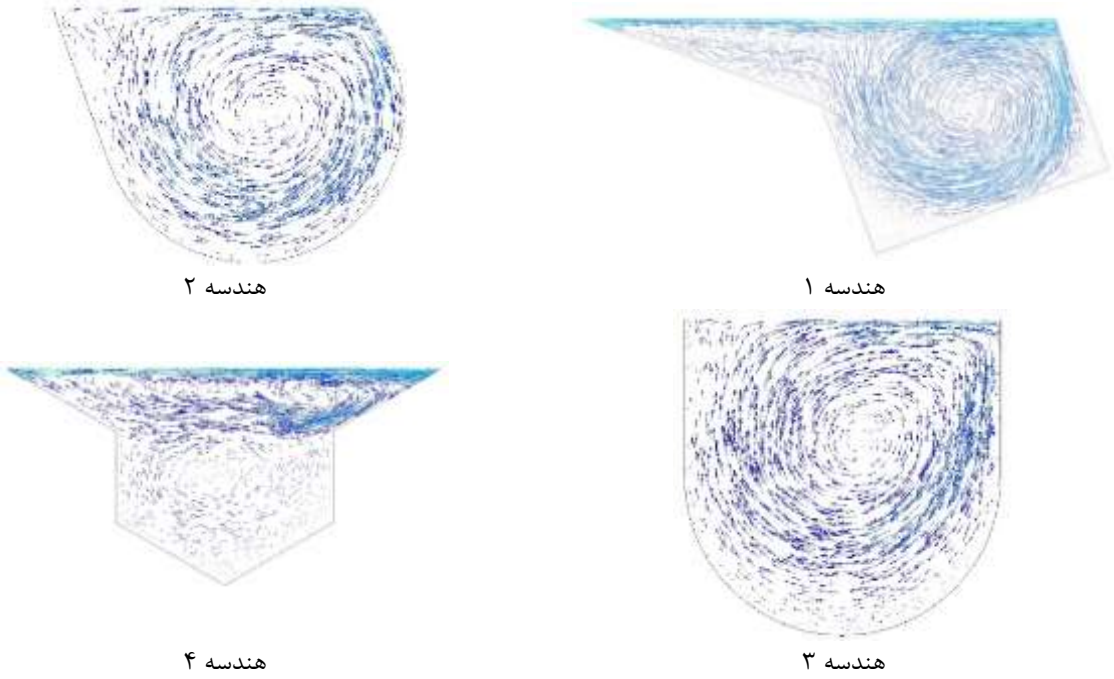
	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل	درصد کاهش پسا
هندسه4 0/15 mm	بدون ریبلت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلت	0/5259	0.0763	0.6022	5/5
هندسه4 0/25 mm	بدون ریبلت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلت	0.5698	0.0213	0.5912	7/2
هندسه 4 0/35 mm	بدون ریبلت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلت	0.5928	-0/0143	0.5784	9/2
هندسه 4 0/45 mm	بدون ریبلت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلت	0.5868	-0/0142	0.5725	10/2

برای بررسی میدان جریان در سطح ریبلت‌دار و فرآیند عملکرد ۴ نوع هندسه ی ریبلتی در کاهش پسا، بردارهای سرعت در داخل شیار ریبلت برای ۴ هندسه مختلف شکل ۳ در شکل ۹ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که بردارهای سرعت در تمامی ریبلت‌های یک نوع هندسه مشابه می‌باشند. کاهش پسای اصطکاکی با تغییر هندسه و ابعاد ریبلت‌ها (که در جدول ۳ تا ۶ قابل ملاحظه است) را می‌توان با توجه به بردارهای سرعت رسم شده در شکل ۹ توضیح داد. همانطور که ملاحظه می‌شود در قسمت پایینی ریبلت (دره ریبلت) در هندسه های ۱ تا ۳ جهت جریان سیال به سمت چپ (خلاف جهت جریان اصلی که در راستای مثبت محور X است) می‌باشد؛ بنابراین پسای اصطکاکی در سطح پایینی ریبلت‌ها در جهت منفی محور X بوده و باعث کاهش میزان پسای اصطکاکی کل در راستای X می‌گردد. اما در هندسه ۴ در قسمت پایینی ریبلت (دره ریبلت)، جهت جریان سیال به سمت راست (در جهت جریان اصلی که در راستای مثبت محور X است) می‌باشد؛ بنابراین پسا اصطکاکی در سطح پایینی ریبلت‌های هندسه ۴ در جهت مثبت محور X بوده و باعث افزایش پسا (البته به میزان پسیار کم) در این هندسه در دو

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

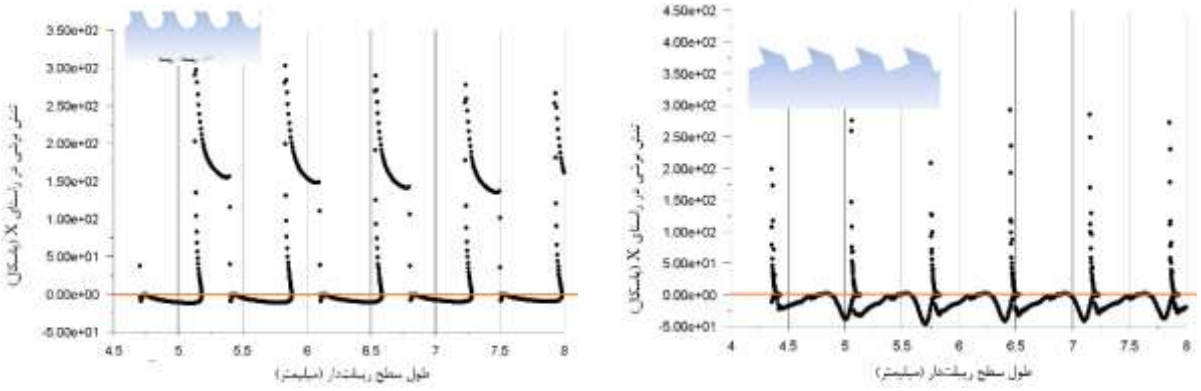
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

ابعادmm ۰/۳۵ و ۰/۴۵mm و کاهش پسا در دو ابعادmm ۰/۱۵ و ۰/۲۵mm می شود. با این وجود هندسه ۴ دومین هندسه ای است که بیشترین میزان کاهش پسا را دارد و بیشترین میزان کاهش پسای آن در همان ابعادmm ۰/۳۵ و ۰/۴۵mm میلیمتر است و دلیل آن سهم بسیار کم پسای اصطکاکی آن در پسای کل می باشد.



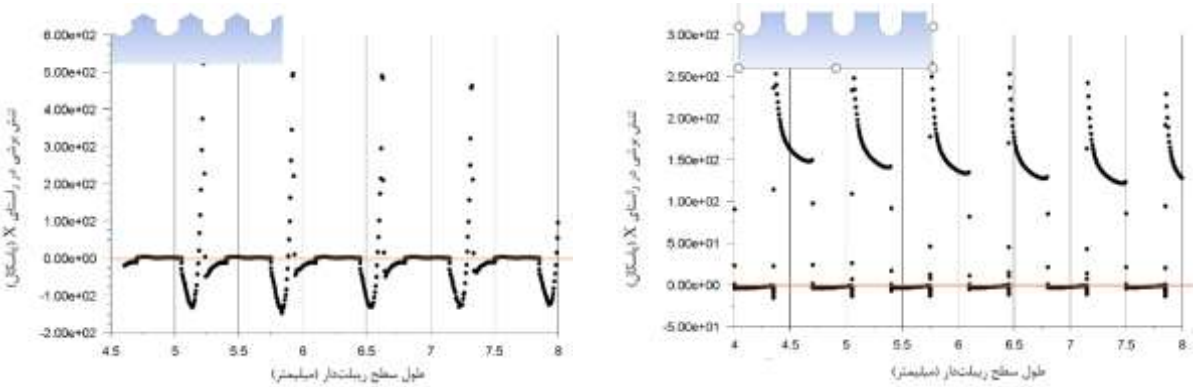
شکل ۹ : نمایش بردارهای سرعت در اولین

به منظور بررسی دقیق‌تر توزیع پسای اصطکاکی، نمودار توزیع مؤلفه تنش برشی در راستای محور X روی سطح ریبلت‌دار در هر ۴ هندسه مورد مطالعه در شکل ۱۰ رسم شده است. توزیع تغییرات فشار در ابتدای سطح ریبلت‌دار برای ۴ نوع هندسه در شکل ۱۱ رسم شده است. مشاهده می‌شود که به دلیل برخورد جریان سیال به نوک ریبلت‌ها نواحی پرفشاری ایجاد می‌گردد که در واقع نقطه سکون جریان نیز می‌باشد. اندازه این فشار در هندسه ۳ کمترین مقدار و در هندسه ۴ بیشترین مقدار را دارد. این موضوع در تطابق با نتایج نشان داده شده در جداول ۳ تا ۶ نیز می‌باشد.

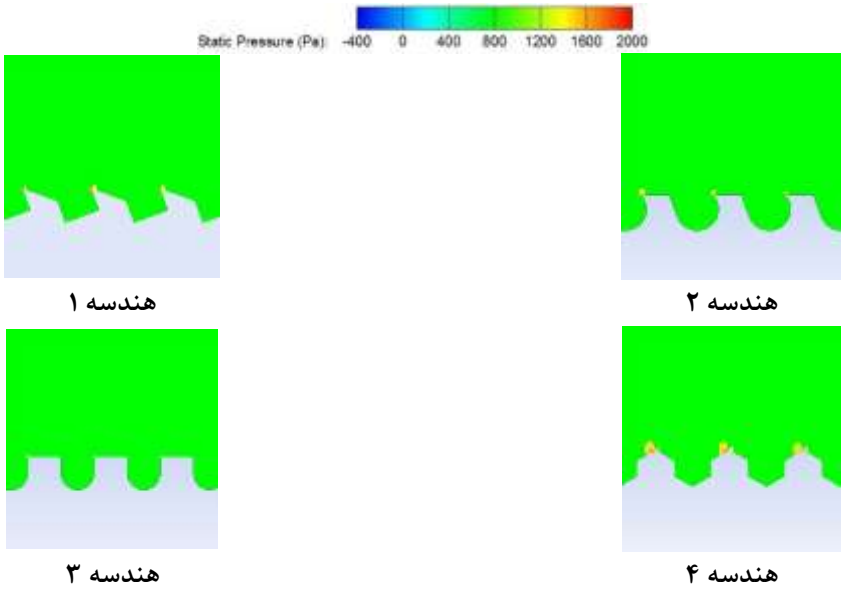


[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]



شکل ۱۰: توزیع تنش برشی در راستای محور X روی سطوح ۴ هندسه



شکل ۱۱. توزیع فشار روی ریبلت‌ها

در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش ابعاد (عرض و ارتفاع) ریبلت‌ها در ۳ هندسه ی ۱ و ۲ و ۴ مقدار پسای کل وارد بر سطح، در مقایسه با سطح صاف بدون ریبلت متناظر، کاهش می‌یابد و این خود یک مزیت است زیرا که ساخت ابعاد بزرگتر هم آسان تر و هم به صرفه تر است. همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است در جریان داخل شیار هندسه های ۱ و ۴ ، یک لایه برشی در سمت بالا و چپ قسمت داخلی ریبلت‌ها ایجاد می‌شود. منظور از این لایه برشی فضایی در میدان جریان داخل ریبلت است که جهت جریان در ضخامت اندکی به طور کامل عکس شده است.

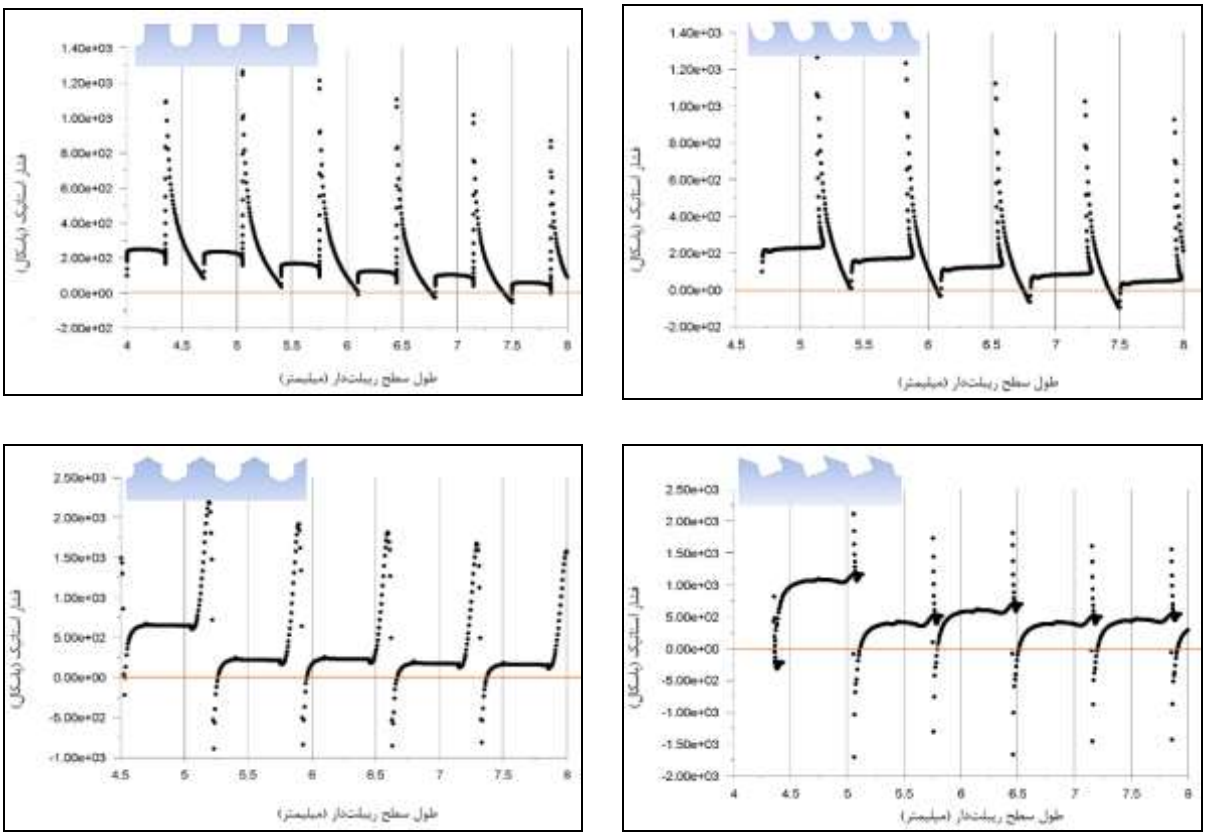


شکل ۱۲:نمایش لایه برشی در میدان جریان داخل ریبلت در هندسه های ۱ و ۴

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

به منظور بهتر مشخص شدن نحوه توزیع فشار بر روی ریبلت‌ها، توزیع فشار بر روی سطح ریبلت‌دار هر ۴ هندسه در شکل ۱۳ رسم شده است. مقدار این نیروی فشاری تحت عنوان پسای فشاری در جداول ۳ تا ۶ آورده شده است.



شکل ۱۳ : توزیع فشار روی سطح ریبلت‌دار در هندسه ۳

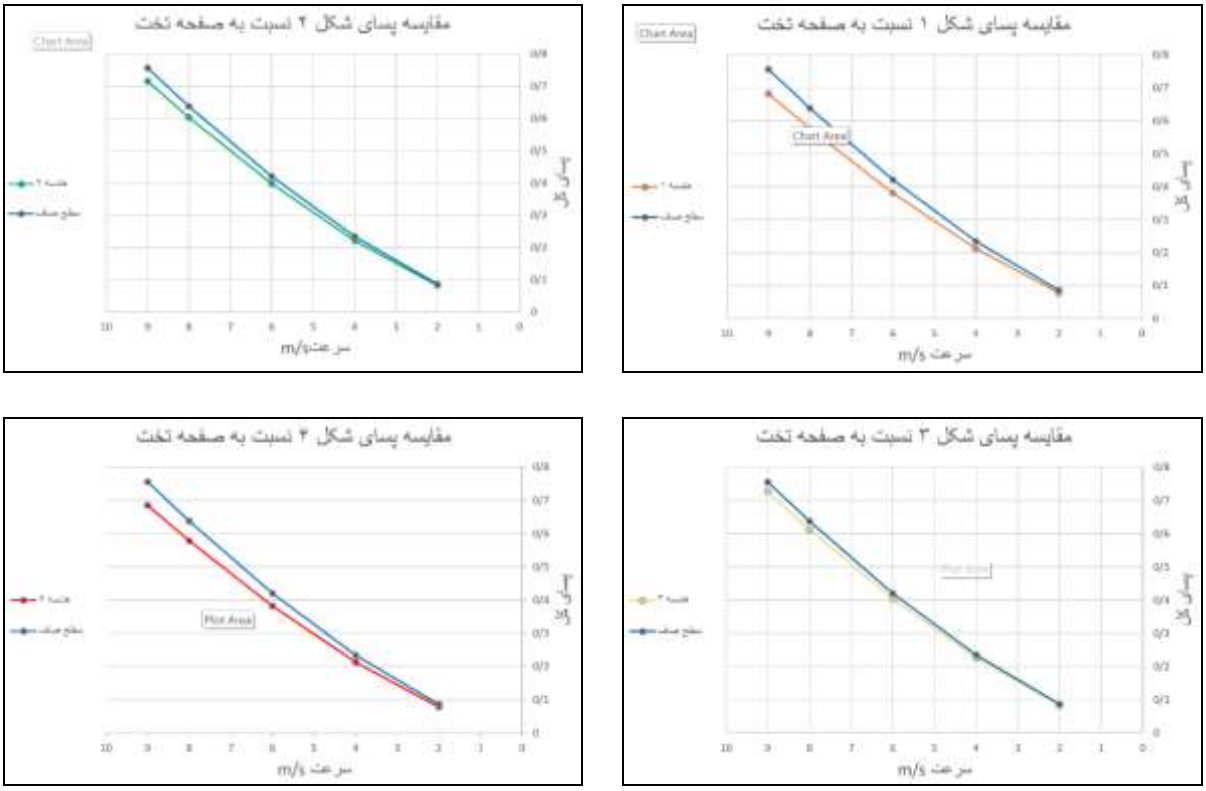
۴-۱) اثر سرعت جریان آزاد

به منظور تعیین اثر سرعت جریان آزاد بر روی عملکرد ۴ هندسه ریبلتی در کاهش میزان پسا، شبیه‌سازی‌ها بر روی هر ۴ هندسه مختلف در ابعاد ثابت۰/۳۵ mm و در سرعت‌های مختلف جریان آزاد برابر ۲ و ۴ و ۶ و ۸ و ۹ متر بر ثانیه انجام شده است. در شکل ۱۴ نمودار پسای کل ۴ هندسه ریبلتی نسبت به سطح صاف آورده شده است.

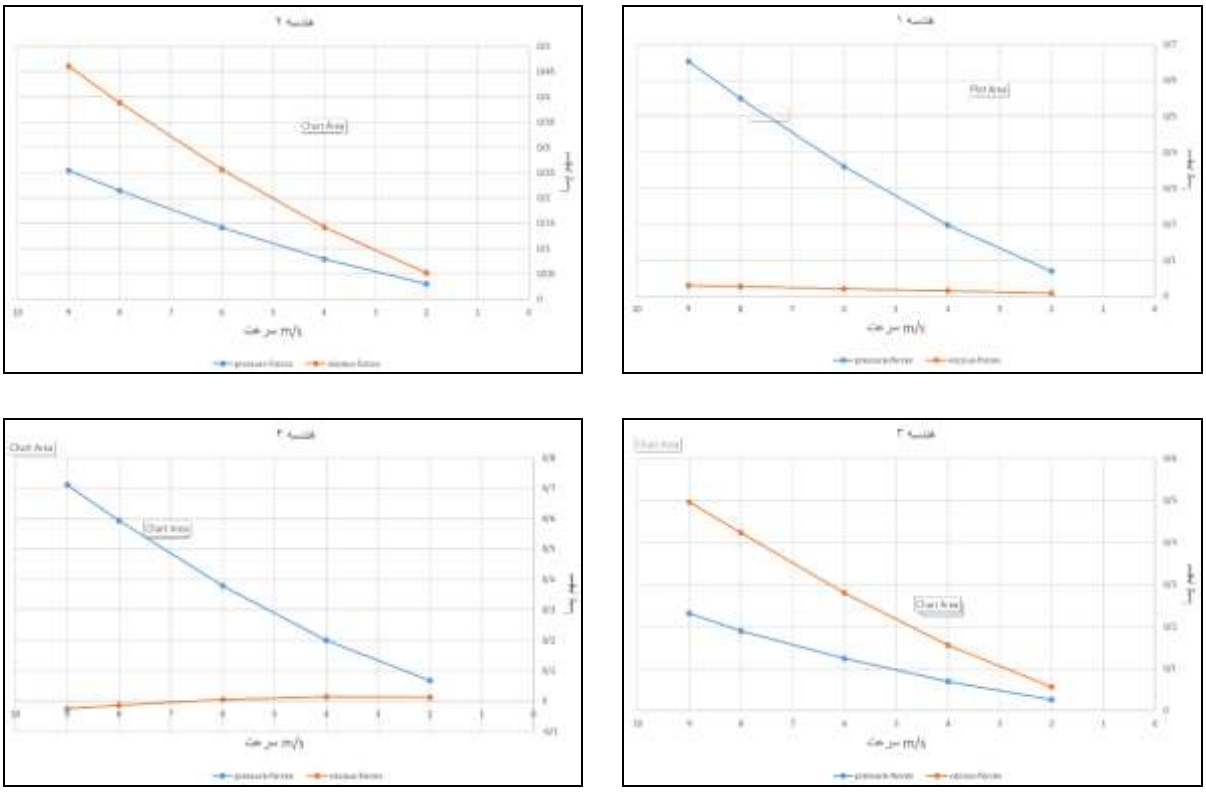
مقایسه میان سهم پسای اصطکاکی و فشاری وارد بر ۴ هندسه ریبلت‌دار در سرعت‌های مختلف جریان آزاد در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]



شکل ۱۴: مقایسه پسای کل وارد بر ۴ هندسه ریبلت دار و سطح بدون ریبلت در سرعت های مختلف جریان آزاد.



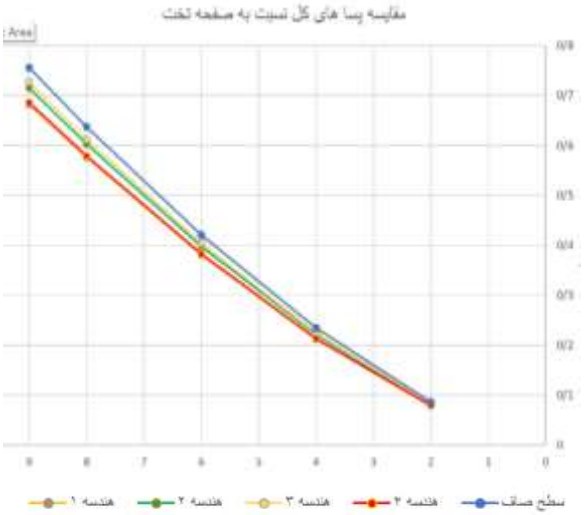
شکل ۱۵ : مقایسه سهم پسای اصطکاکی و فشاری وارد بر سطح ۴ هندسه ریبلت دار در سرعت های مختلف جریان آزاد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

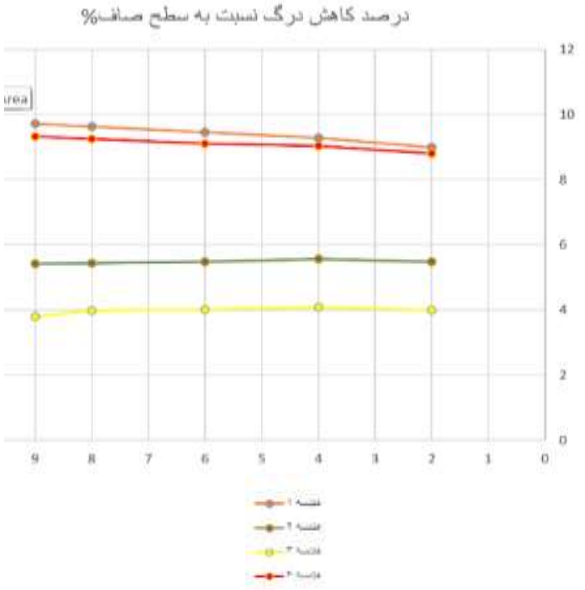
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

همانطور که ملاحظه می‌گردد در سرعت های مختلف در هندسه های ۱ و۴ سهم پسای فشاری از پسای اصطکاکی بیشتر است و در هندسه های ۲ و۳ سهم پسای اصطکاکی از پسای فشاری بیشتر است. با افزایش سرعت اختلاف میان پسای فشاری و اصطکاکی در هندسه های ۱ و۴ بسیار بیشتر از هندسه ی ۲ و ۳ می شود.

پسای کل وارد بر سطح هر ۴ هندسه ریبلت‌دار در سرعت‌های مختلف جریان آزاد با پسای وارد بر سطح بدون ریبلت متناظر در شکل ۱۶ مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که پسای وارد بر سطح هر ۴ هندسه همواره کمتر از پسای وارد بر سطح بدون ریبلت است که این موضوع به خوبی نشان‌دهنده عملکرد موفقیت‌آمیز این ۴ هندسه در کاهش پسای وارد بر سطح در محدوده رژیم جریان آرام است.



شکل ۱۶. نمودار سهم پسای کل ۴ هندسه در ابعاد ۰/۳۵ میلی متری و در سرعت های مختلف نسبت به سطح صاف



شکل ۱۷: نمودار درصد کاهش پسای ۴ هندسه در ابعاد ۰/۳۵ میلی متری و در سرعت های مختلف نسبت به سطح صاف

برای مشاهده بهتر درصد کاهش پسای وارد بر سطح ۴ هندسه نسبت به سطح بدون ریبلت در سرعت‌های مختلف جریان آزاد، نمودار درصد کاهش پسا برای ۴ هندسه در شکل ۱۷ رسم شده است.

مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت جریان آزاد در هندسه های ۱ و ۴ درصد کاهش پسا نیز افزایش می‌یابد اما در هندسه های ۲ و۳ درصد کاهش پسا با افزایش سرعت مقدار بسیار کمی کاهش می یابد که در جدول۷ نیز مقادیر عددی آن قابل مشاهده می باشد . کمترین درصد کاهش پسا مربوط به هندسه ۳ و در سرعت ۹ m/s و بیشترین درصد کاهش پسا مربوط به هندسه۱ ودر سرعت۹ m/s است. متوسط درصد کاهش پسا در هندسه ۱ برابر ٪ ۹/۴، در هندسه ۲ برابر ٪۵/۴ ، در هندسه ۳ برابر ٪۳/۹ و در هندسه ۴ برابر ٪۹/۰۹ درصد محاسبه شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

جدول ۷ : درصد کاهش پسای مربوط به ۴ هندسه در اندازه ثابت ۰.۳۵ میلیمتر و سرعت متغیر

هندسه	سرعت	drag reduction %
1	2m/s	8/99
1	4m/s	9/28
1	6m/s	9/44
1	8m/s	9/63
1	9m/s	9/72
2	2m/s	5/48
2	4m/s	5/56
2	6m/s	5/47
2	8m/s	5/43
2	9m/s	5/41
3	2m/s	3/99
3	4m/s	4/08
3	6m/s	4
3	8m/s	3/98
3	9m/s	3/78
4	2m/s	8/79
4	4m/s	9/04
4	6m/s	9/1
4	8m/s	9/24
4	9m/s	9/31

۵-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر استفاده از ۴ نوع هندسه ریبلتی مختلف در ۴ ابعاد مختلف، بر کاهش میزان پسای وارد بر سطح در جریان آرام پرداخته شد. برای این منظور از دینامیک سیالات محاسباتی در فضای دوبعدی استفاده گردید تا حرکت جریان آب بر روی سطح شبیه‌سازی شود. اثر پارامترهای هندسی ۴ نوع هندسه ریبلتی شامل عرض و ارتفاع و هم چنین ابعاد مختلف هرکدام از هندسه ها و هم‌چنین اثر میزان سرعت جریان آزاد بر روی کاهش پسای وارد بر سطح مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- ریبلت‌های هندسه ۱ و ۴ نسبت به سایر هندسه ها درصد کاهش پسای بالاتری را نشان دادند

۲- میزان پسای وارد بر سطح در ۳ هندسه ۱ ، ۲ و ۴ با افزایش ابعاد هندسه ها افزایش می یابد.

۳- بیشترین و کمترین مقدار کاهش پسا در یک سرعت ثابت و با تغییر ابعاد هندسه ها به ترتیب مربوط به هندسه ۱ و در اندازه ۰/۴۵mmو هندسه ۳ و در اندازه ۰/۱۵mm با میزان درصد کاهش پساهای ٪۱۰/۶ و ٪۲/۳ می باشد.

٤- بیشترین و کمترین مقدار کاهش پسا در یک اندازه ثابت (۰/۳۵mm) و با تغییر سرعت جریان آزاد (۲m/s ~۹) به ترتیب مربوط به هندسه ۱ و در سرعت ۹m/s و هندسه ۳ در سرعت ۹m/s به ترتیب با میزان درصد کاهش پساهای ٪۹/۷ و ٪۳/۷ می باشد.

٥- پسای کل وارد بر سطح بدون ریبلت تنها به دلیل پسای اصطکاکی است اما پسای وارد بر سطح ریبلت‌دار مجموع پسای اصطکاکی و فشاری می‌باشد.

٦- در هندسه های ۱ و ۴ ، سهم پسای فشاری بیشتر از پسای اصطکاکی وارد بر سطح ریبلت‌دار است اما در هندسه های ۲ و۳ سهم پسای اصطکاکی بیشتر از سهم پسای فشاری است.

۷- با توجه به نتایج حاصله هندسه های ۱ و ۴ مناسب ترین گزینه از لحاظ دارا بودن بیشترین میزان کاهش پسا می باشند ، اما از لحاظ قابلیت ساخت و تولید هندسه ۴ مناسب ترین گزینه می باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

فهرست علائم :

علائم انگلیسی		واحد
ضریب پسا	C_D	
ضریب اصطکاک	C_f	
ارتفاع ریبلت	h	mm
عرض ریبلت	w	mm
فاصله ریبلت ها	S=2w	mm
سرعت جریان آزاد	U_∞	m/s
عدد رینولدز	Re	
علائم یونانی		
چگالی	ρ	kg/m^3
ویسکوزیته سینماتیکی	ν	
تنش برشی دیواره	τ_w	Pa

مراجع

[1] Koeltzsch, K., A. Dinkelacker, and R. Grundmann, Flow over convergent and divergent wall riblets. Experiments in fluids, 2002. 33(2): p. 346-350.

[2] Byun, D. and H.C. Park. Drag reduction on micro-structured super-hydrophobic surface. in 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2006. IEEE.

[3] Sareen, A., et al., Drag reduction using riblet film applied to airfoils for wind turbines. Journal of Solar Energy Engineering, 2014. 136(2): p. 021007.

[4] Tachie, M. F., Agelinchaab, M., & Shah, M. K. (2007). Turbulent flow over transverse ribs in open channel with converging side walls. International journal of heat and fluid flow, 28(4), 683-707.

[5] Scholle, M., Hydrodynamical modelling of lubricant friction between rough surfaces. Tribology International, 2007. 40(6): p. 1004-1011.

[6] Benschop, H. and W.-P. Breugem, Drag reduction by herringbone riblet texture in direct numerical simulations of turbulent channel flow. Journal of Turbulence, 2017. 18(8): p. 717-759.

[7] Martell, M. B., Rothstein, J. P., & Perot, J. B. (2010). An analysis of superhydrophobic turbulent drag reduction mechanisms using direct numerical simulation. Physics of Fluids, 22(6), 065102.

[8] Wang, B., et al., Drag Reduction by Microvortexes in Transverse Microgrooves. Advances in Mechanical Engineering, 2014. 6: p. 734012.

[9] Li, W., et al., Turbulent drag reduction by spanwise traveling ribbed surface waves. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2015. 53: p. 101-112.

[10] Rastegari, A., & Akhavan, R. (2015). On the mechanism of turbulent drag reduction with super-hydrophobic surfaces. Journal of Fluid Mechanics, 773.

[11] Zeinali, B., Ghazanfarian, J., & Lessani, B. (2018). Janus surface concept for three-dimensional turbulent flows. Computers & Fluids, 170, 213-221.

[12] Gu, Yun-qing, et al. "Characteristics and mechanism investigation on drag reduction of oblique riblets." Journal of Central South University 24.6 (2017): 1379-1386.

[13] Rapp, H., I. Zoric, and B. Kasemo, Microstructured Surfaces for Drag Reduction Purposes: Experiments and Simulations on Rectangular 2D Riblets. MRS Online Proceedings Library Archive, 2005. 899.

[14] Hou, Jianfeng, Babak Vajdi Hokmabad, and Sina Ghaemi. "Three-dimensional measurement of turbulent flow over a riblet surface." Experimental Thermal and Fluid Science 85 (2017): 229-239.

[15] Lee, J., Jelly, T. O., & Zaki, T. A. (2015). Effect of Reynolds number on turbulent drag reduction by superhydrophobic surface textures. Flow, Turbulence and Combustion, 95(2-3), 277-300.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

[16] El-Samni, O. A., H. H. Chun, and H. S. Yoon. "Drag reduction of turbulent flow over thin rectangular riblets." International Journal of Engineering Science 45.2-8 (2007): 436-454.
[17] Song, X. W., Zhang, G. G., Wang, Y., & Hu, S. G. (2011). Use of bionic inspired surfaces for aerodynamic drag reduction on motor vehicle body panels. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 12(7), 543-551.
[18] Arenas, I., et al., Comparison between super-hydrophobic, liquid infused and rough surfaces: a direct numerical simulation study. Journal of Fluid Mechanics, 2019. 869: p. 500-525.
[19] Fu, Y., C. Yuan, and X. Bai, Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces. Biosurface and Biotribology, 2017. 3(1): p. 11-24.
[20] Kurita, M., et al. Flight Test of a Paint-Riblet for Reducing Skin-Friction. in 2018 Applied Aerodynamics Conference. 2018.
[21] Huang, C., Liu, D., & Wei, J. (2016). Experimental study on drag reduction performance of surfactant flow in longitudinal grooved channels. Chemical Engineering Science, 152, 267-279.
[22] Yang, S., Li, S., Tian, H., Wang, Q., & Jiang, N. (2015). Coherent spanwise structures in turbulent boundary layer over drag-reducing riblets. Transactions of Tianjin University, 21(4), 317-323.
[23] Zhang, Y., & Che, D. (2012). Effects of two-dimensional V-shaped grooves on turbulent channel flow. Experiments in fluids, 52(2), 315-328.
[24] Ma, Hongwei, Qiao Tian, and Hui Wu. "Experimental study of turbulent boundary layers on groove/smooth flat surfaces." Journal of Thermal Science 14.3 (2005): 193-197.
[25] Gang, Z., et al., Investigation on the Effect of Transverse Grooves on Friction Force, in Advanced Tribology. 2009, Springer. p. 787-790.
[26] Cui, J. and Y. Fu, A numerical study on pressure drop in microchannel flow with different bionic micro-grooved surfaces. Journal of Bionic Engineering, 2012. 9(1): p. 99-109.
[27] Boomsma, A. and F. Sotiropoulos, Riblet drag reduction in mild adverse pressure gradients: a numerical investigation. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2015. 56: p. 251-260.
[28] Zhi-hong, S., & Ting-ting, S. Drag Reduction Study on Rotors with Triangle Groove Surface. In 2009 International Conference on Energy and Environment Technology.
[29] Friedmann, E., Portl, J., & Richter, T. (2009). A study of shark skin and its drag reducing mechanism. In Advances in Mathematical Fluid Mechanics (pp. 271-285). Springer, Berlin, Heidelberg.
[30] Dean, Brian, and Bharat Bhushan. "The effect of riblets in rectangular duct flow." Applied Surface Science 258.8 (2012): 3936-3947.
[۳۱]حاجی‌خان میرزایی, امیر, رئوف پناه, علیرضا. (۱۳۹۸). بررسی عددی فرآیند کاهش پسا در جریان آرام با استفاده از ریبلت‌های مستطیلی. علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک, ۳۱(۱), ۱۷۳-۱۶۵. doi: 10.22067/fum-mech.v31i1.79677 .

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

چکیده انگلیسی:

A Numerical Investigation of Flow Drag Reduction by Riblet Surfaces in different geometries and dimensions

Hosein safari [1*] , Alireza Raoufpanah [2]

1- Mechanical engineering, Islamic Azad University, Yadegar-e-Imam Khomeini (rah) Branch, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Mechanical engineering, Islamic Azad University, Yadegar-e-Imam Khomeini (rah) Branch, Tehran, Iran.

Received: March 2022 Accepted: June 2022

Abstract

Nowadays, due to the shortage of energy resources, the industries pay more attention to the energy efficiency. in terms of transportation, reducing of energy consumption and increasing the speed of marine vessels and submarines, the surface friction resistance holds an important role. riblets surfaces are a passive method that have ability of surface drag reduction. This study, investigates numearically, the drag reduction of 4 different and new geometries of riblets in different dimensions and velocities. the flow is in the laminar regime range and riblets are aligned perpendicular to the flow direction. Also the distribution of shear stress and static pressure on the riblet surfaces are examined. The Results showed that geometries 1 and 4 have a higher drag reduction (about 10.7% and 10.2%) relative to the geometries 2 and 3 (about 7.7% and 4.4%) Respectively. Unlike geometries 1 and 4, geometries 2 and 3 have a higher viscose force relative to the pressure force on their surfaces. Also the study of speed changes showed that geometries 1 and 4 have a higher drag reduction in each speed respectively.

Key words: Riblet, Drag Reduction, Numerical Simulation Efficiency.

*corresponding author: hossfri.unive@gmail.com

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5]

Cite this article as: Hosein safari, Alireza Raoufpanah. A Numerical Investigation of Flow Drag Reduction by Riblet Surfaces in different geometries and dimensions. Journal of Energy Conversion, 2022, 9(2), 33-53.
DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5